

学校编码: 10384
学 号: 23020111153065

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于高斯过程回归学习的超分辨率重建及后
处理方法研究

Image Super-resolution based on Gaussian Process

Regression and its Post-processing

廖梦杰

指导教师姓名: 曲延云 副教授

专 业 名 称: 计 算 机 技 术

论文提交日期: 2014 年 5 月

论文答辩时间: 2014 年 5 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席:

评 阅 人:

2014 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 廖梦杰

2014年5月14日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

() 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）： 颜博杰

2014 年 5 月 14 日

摘要

图像的超分辨率重建技术是近几十年来应用最为广泛的数字图像处理技术。随着机器学习和模式识别技术的发展,基于学习的图像超分辨率重建技术已经成为解决超分辨重建问题的一个非常重要的工具。然而,现有的基于样例学习的超分辨方法采用典型的非概率形式,没有给出具体概率形式的超重建模型,而且其中的参数多是通过交叉验证获得。为此,本文主要从不确定性分析的角度,利用高斯过程回归理论对超分辨重建建模,研究可行性求解算法及超分辨重建的后处理方法。本文的主要贡献如下:

1) 提出了基于组合优化的图像超分辨后处理算法。基于回归函数的拟合值给出的是标量形式的函数值,因此,导致基于图像块形式的超分辨重建在同一个像素位置上得到多个候选的像素拟合值。本文通过对这些候选值的组合优化学习,改善图像的重建质量。

2) 提出了基于边缘属性限制的图像超分辨后处理算法。现有的基于高斯核回归学习的超重建方法,针对图像的外观特征进行建模,忽视了边缘在主观视觉上的作用,为此,本文在回归学习重建超分辨图像的基础上,针对图像边缘属性进行建模,进一步优化图像质量。

3) 提出了基于高斯过程回归稀疏求解的图像超分辨算法。建立局部高斯过程回归模型,解决高斯过程回归求解超分辨问题的可行性问题;进一步利用稀疏求解算法,不仅优化高斯核函数的超参数,而且也优化了训练的初始输入,从而得到更精确的高斯过程回归解。

实验证明本文所提超分算法及后处理方法在图像视觉主观评价和信噪比评价标准下可以与当前流行的超重建方法相媲美,重建出图像边缘平滑,并且在主观视觉方面和客观评价标准上都超过实验中的三种超分辨率重建方法。

关键词: 组合优化; 边缘光滑; 高斯过程

Abstract

Image super-resolution technique has become a hot topic in the field of image processing these decades and super-resolution methods based on learning has turned out to be an important approach to solve the problem of super-resolution. However, existing super-resolution methods based on example learning usually utilize the non-probability form to build models and obtain parameters by cross-validation. So, this paper builds models based on theory of Gaussian process regression, and studies the feasibility algorithm and the post-processing of super-resolution from the perspective of uncertainty analysis. The main contributions are as follows:

- 1) We proposed image super-resolution post-processing algorithm based on combination optimization. A fitting value based on the regression function is a scalar function. So, when reconstructing an image by the super-resolution in forms of image patches, there are multiple candidate fitting values for each pixel. In this paper, the quality of image reconstruction can be improved by learning the combination optimization of the candidate values.
- 2) We proposed image super-resolution based post-processing algorithm based on edge attributes restrictions. Traditional super-resolution methods based on Gaussian kernel regression build model according to appearance feature of image, which ignores the effect of edges on vision. Therefore, this paper aims at modeling based on the image edge attributes and optimizing the image quality further.
- 3) We proposed image super-resolution based on sparse solution for Gaussian process regression. This algorithm solves the feasibility problem of Gaussian process regression by building the local Gaussian process regression model. Then to get more accurate solutions, the sparse algorithm implemented to optimize the hyper-parameters in the Gaussian kernel function, as well as the initial inputs for training.

The experimental results show that the super-resolution and post-processing methods, which are introduced to reconstruct a high-resolution image in this paper,

are comparable to the existing popular super-resolution methods both in subjective and objective visual evaluation criteria. And our approach performs better than the other three approaches in the experiments.

Key Words: Combination Optimization;Edge Smooth;Gaussian Processes

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

摘要.....	VII
Abstract	IX
目录.....	XI
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 基于插值的图像超分辨率重建	3
1.2.2 基于重构的图像超分辨率重建	4
1.2.3 基于学习的图像超分辨率重建	9
1.3 本文的主要研究内容	11
1.4 本文的章节安排	12
第二章 相关背景知识介绍.....	15
2.1 回归理论概述	15
2.1.1 回归模型	16
2.1.2 回归模型的估计方法	17
2.2 K-d tree.....	19
2.3 训练库的构建	21
2.4 图像质量的评价标准.....	22
2.3.1 主观质量评价标准	22
2.3.2 客观质量评价标准	22
2.5 本章小结.....	24
第三章 基于组合优化的图像超分辨后处理	25
3.1 引言	25
3.2 高斯过程回归（Gaussian Processes Regression）	25
3.3 基于局部高斯过程回归学习的图像超分辨算法	27

3.4 高斯回归值的组合优化	28
3.4.1 训练参数 \mathcal{W}	29
3.4.2 计算权重 w_j 及图像重建	29
3.5 算法设计与分析	30
3.6 实验结果与分析	31
3.7 本章小结	33
第四章 基于边缘属性限制的图像超分辨后处理	35
4.1 引言	35
4.2 The Berkeley Segmentation Engine (BSE)	35
4.3 基于图像边缘光滑限制的图像超分辨	36
4.4 算法设计与分析	38
4.5 实验结果与分析	38
4.6 本章小结	45
第五章 基于高斯过程回归稀疏求解的图像超分辨	47
5.1 引言	47
5.2 稀疏伪输入高斯过程 (Sparse Pseudo-input Gaussian processes)	47
5.3 算法设计与分析	49
5.4 实验结果与分析	51
5.4.1 实验环境及实验设置	51
5.4.2 图像重建质量比较	51
5.6 本章小结	59
第六章 总结和展望	61
6.1 总结	61
6.2 后续研究工作展望	62
参考文献	63
攻读硕士学位期间发表论文及科研情况	69
致谢	71

Table of Contents

Chapter 1	Introduction.....	1
1.1	Background	1
1.2	Related work	2
1.2.1	Interpolation Based Super-resolution	3
1.2.2	Reconstruction Based Super-resolution	4
1.2.3	Example-based Super-resolution	9
1.3	Main Work.....	11
1.4	Outline.....	12
Chapter 2	The Relevant Background	15
2.1	The Regression Theory	15
2.1.1	Regression Models.....	16
2.1.2	Estimation Methods for Regression Method	17
2.2	K-d tree	19
2.3	Construction of Training Set.....	21
2.4	Image Quality Evaluation	22
2.3.1	Subjective Evaluation	22
2.3.2	Objective Evaluation.....	22
2.5	Summary.....	24
Chapter 3	Post-processing for Image Super-resolution Based on Combination Optimization	25
	Introduction.....	25
3.2	Gaussian Process Regression	25
3.3	Image Super-resolution Based Gaussian Process.....	27
3.4	Combination Optimization for Gaussian Process Regression	28
3.4.1	Parameters Training	29
3.4.2	Weights Computing.....	29
3.5	Algorithm.....	30

3.6	Experiments and Analysis	31
3.7	Summary.....	33
Chapter 4	Post-processing for Image Super-resolution Based on	
Edge Attributes		35
4.1	Introduction.....	35
4.2	The Berkeley Segmentation Engine (BSE)	35
4.3	Super-resolution Based on Edge Smooth Constrained.....	36
4.4	Algorithm.....	38
4.5	Experiments and Analysis	38
4.6	Summary.....	45
Chapter 5	Image Super-resolution Based on Sparse Solution for	
Gaussian Process Regression		47
5.1	Introduction.....	47
5.2	Sparse Solution for Gaussian Process	47
5.3	Algorithm.....	49
5.4	Experiments and Analysis	51
5.4.1	Experimental Environment	51
5.4.2	Result Comparison.....	51
5.6	Summary.....	59
Chapter 6	Conclusions and Future Work.....	61
6.1	Conclusions.....	61
6.2	Future Work	62
References		63
Scientific Research Activities and Achievements		69
Acknowledgements		71

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着科学技术的飞速发展，现代社会信息与日俱增，人们获得的信息量越来越多，人们对接受到的信息要求也越来越高。人与人之间信息的传递主要依靠语音和图像，研究表明，人类传递的信息中语音信息占 20%，而图像和视频等视觉信息却高达 75% 以上。在我们的日常生活中时时刻刻都需要与各种图像发生着密切关系，甚至我们记忆中的大部分内容都是由图像信息组成。图像不仅仅作为物质表象存在，而且还是人类纷繁复杂的思维活动的重要组成部分。图像在人们的生活中意义重大，它是人们感知视觉的基础。

在数字图像处理中，图像分辨率是指图像中包含的信息量，即图像中每英寸内存储了多少像素点，也叫像素密度 PPI (Pixels Per Inch)。高分辨率图像 (High Resolution, HR) 是指在给定大小的图像中存储信息更多、像素密度更高的图像。高分辨率图像相对于低分辨率图像具有更多的细节信息和更细腻的画质。如今“让我们看得更清楚更清晰”的迫切需求日益凸显，在这样的背景下，高分辨率重建成为图像处理领域一个备受关注的研究主题。图像的分辨率越高则图像越清晰、细节越丰富，其表达信息的能力越强，从而高分辨率图像更有利于改善图像目标理解和识别性能等。高分辨率图像技术在日常生活中也得到了广泛认知和应用，像高清视频、视网膜屏 (apple 公司提出的 retina 屏幕)、HDTV、1080P 等新名词不断出现在我们的日常生活中。

图像的超分辨率重建技术在工业、日常生活、国防军事、航天航空、国土安全、资源探测及卫星成像等众多领域有着广泛的应用。例如在安防监控系统中，由于经济等诸多因素的存在，只能得到由连续多帧的低分辨率图像序列组成的视频信号，但是为了提高对突发事件的监控能力，需要对视频序列中的特定目标进行处理，以得到清晰度更高的目标图像，如案件取证中对监控视频进行多帧图像的超分辨重建可得到犯罪嫌疑人的高分辨图像。甚至在地铁、商城、道路交通、机场等安全监控视频中，利用多帧图像的超分辨重建技术对监控视频进行处理，

可得到清晰的监控录像，方便安全人员及时处理突发事件及异常情况。在医学成像系统中，利用图像的超分辨率重建技术可以对病灶部位进行处理得到清晰的高分辨率图像，帮助医生进行更准确的诊断。由于在采集卫星遥感图像、资源探测图像和军事侦察图像等时会受到各种各样条件的限制和影响，得到的图像分辨率低且会出现细节模糊、边缘有较严重的锯齿现象、受噪声影响等问题，我们一般在不改变当前卫星成像系统的分辨率的前提下，利用图像的超分辨率重建技术能获得高于成像系统分辨率的图像；在国防军事和航天遥感图像的识别观测应用上，图像的超分辨率重建技术的理论和应用意义则更加重大。

1.2 国内外研究现状

在上个世纪 60 年代，Harris^[1]和 Goodman^[2]以单张图像复原的概念和方法提出了图像的超分辨率技术，并奠定了超分辨率的数学基础。到 80 年代初，Tsai 和 Huang^[3]利用多帧图像序列对低分辨率图像进行恢复，并实现了基于频率域的图像重建算法，但这种算法仅仅针对线性不变空间图像降质和全局平移运动的图像降质情况适用。Kim 等人^[4]在此基础上对图像的噪声和模糊进行了处理。由于在频率域建立了低分辨率（Low Resolution）观测图像的离散傅里叶变换和高分辨率（High Resolution）图像的连续傅里叶变换之间的对应关系，但这种方法的应用范围有限，只适用于线性不变模糊模型和全局运动的图像观测模型中。空间域的图像超分辨率重建算法是在空间频域范围内对低分辨率图像的重建过程进行建模，可以对局部和全局几何形变、图像采集过程中产生的噪声（高斯噪声、散粒噪声、椒盐噪声）以及各种模糊（光学模糊、运动模糊、传感器模糊等）进行建模，具有最大后验概率法（Maximum a Posterior, MAP）、凸集投影法（Projection Onto Convex Sets, POCS）、迭代反向投影法（Iterative Back Projection, IBP）及非均匀采样内插法（Non-Uniform Interpolation Method）等^[5]。到 90 年代初，随着计算机硬件和软件技术的不断发展，图像的超分辨重建技术得到了飞速的发展，特别是在航天航空领域（如“嫦娥工程”7 米分辨率全月球影像图）、医学计算机成像的分析、国防军事遥感图像等领域。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库